

5 . 免震建築物

5.1 はじめに

平成20年6月14日の岩手・宮城内陸地震に引き続き、7月24日に発生した岩手県沿岸北部の地震被害を受けた地域の免震建築物についても、本震発生直後より情報を収集^{5.1)}し、現地調査を行った。

5.2 調査行程

図-5.2.1に調査建築物位置を示す。建築物の名称をH建築物～K建築物として記号化しているが、この記号は本章内で独立して定め、用いているものである。北側の2棟（J、K）が青森県内に、南側の2棟（H、I）は岩手県内に存している。また、岩手・宮城内陸地震の調査を行った1棟（C）についても調査を行ったことから、あわせて図に記入した。これらの調査は、表-5.2.1の調査行程に示すとおり1回で実施した。

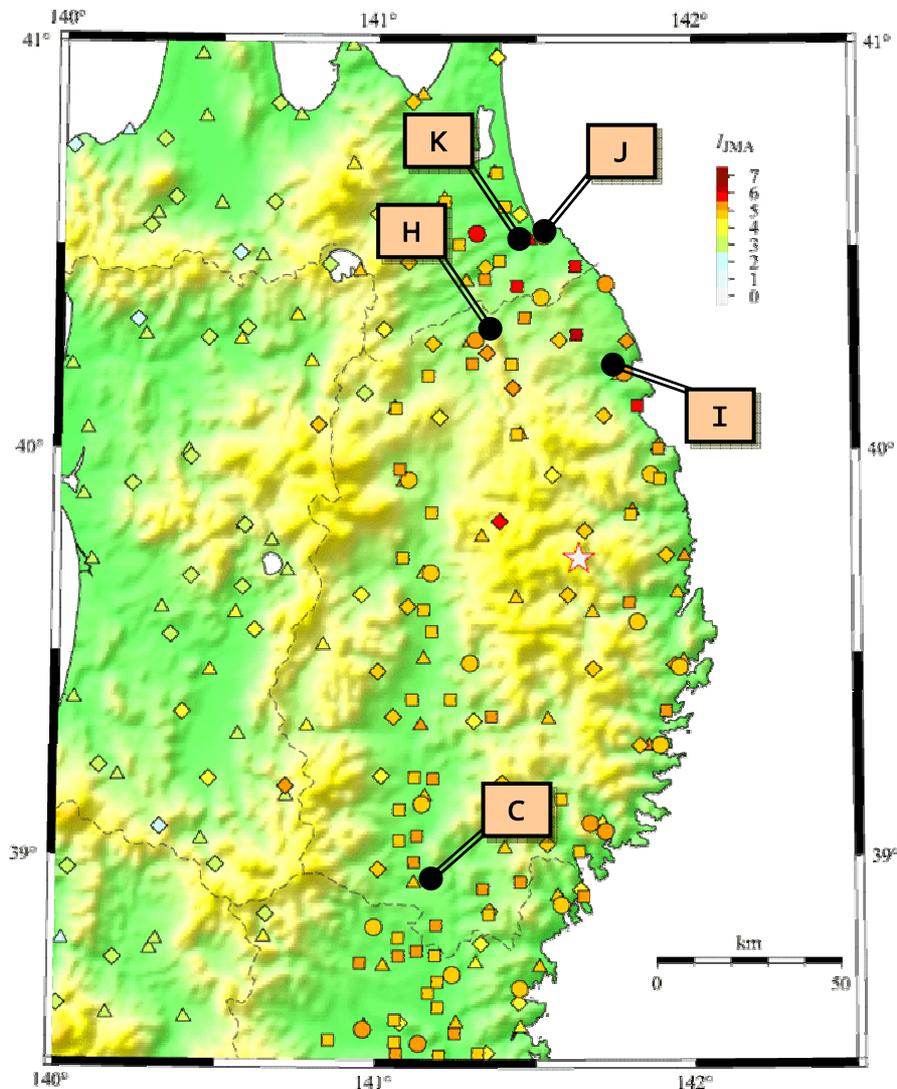


図-5.2.1 免震建築物位置（記号は表-5.2.1に対応）

表-5.2.1 調査行程及び免震建築物概要

	記号	建物用途	上部構造形式と階数	最寄りの 気象庁震度
一次調査 7/31～8/1	H建築物	病院	CFT造4F+B1F	5強
	I建築物	集合住宅	RC造8F	5強
	J建築物	事務所	SRC造10F+B1F	6弱
	K建築物	病院	RC造7F+B1F	6弱
	C建築物	病院	I棟：S造5F+SRC造B1F N棟：RC造3F+B1F	5弱

5.3 調査体制

調査は次の体制で実施した。

飯場 正紀 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ長

小豆畑達哉 国土交通省国土技術政策総合研究所 構造基準研究室長

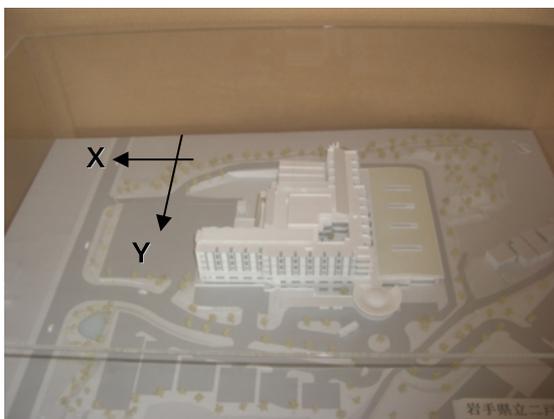
井上 波彦 国土交通省国土技術政策総合研究所 基準認証システム研究室 主任研究官

5.4 被害調査結果

5.4.1 H建築物

(1) 建築物概要

H建築物は、岩手県二戸市において、平成16年に建設されたCFT造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造）4階+地下1階の免震建築物（病院）である（図-5.4.1）。図面によればGL - 8m~10m程度を支持層とする直接基礎が採用されている。



(a) 建築物外観



(b) 免震であることの表示（最大変形量55cm）

図-5.4.1 H建築物（CFT造4階建て）

建築物の平面形状は、おおよそX方向80m×Y方向80mの矩形の一部から25m程度の張り出し部分を設けたような形状をしており、次に示す免震装置が設置されている。

積層ゴム支承材...109基（700×75、800×32、900×2）

鉛ダンパー...22基（X方向×9、Y方向×13）

ループ型ダンパー...10台（90）

U字型ダンパー...6基

本建築物においては、さらに建築物の中央付近の3箇所（基礎底盤、免震層直上及び屋上階）で地震観測が行われており（図-5.4.2）本震を含めて観測記録が得られている。観測記録に関しては、デジタルデータを入手し、解析を実施した。詳細は5.5節を参照されたい。



図-5.4.2 免震層内の強震計設置状況

(2) 被害等の状況

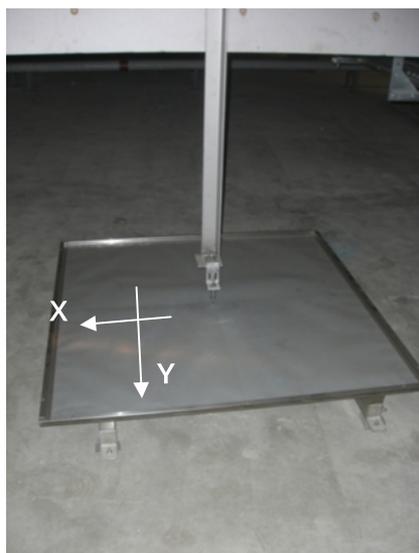
建設地周辺の本震による震度は5強とされている。ただし、基礎底盤上での観測記録を用いて計算した計測震度は3.9であり、敷地周辺での震度は公表値よりやや小さかったと考えられる。

職員へのヒアリングを行い、次のような証言が得られた。

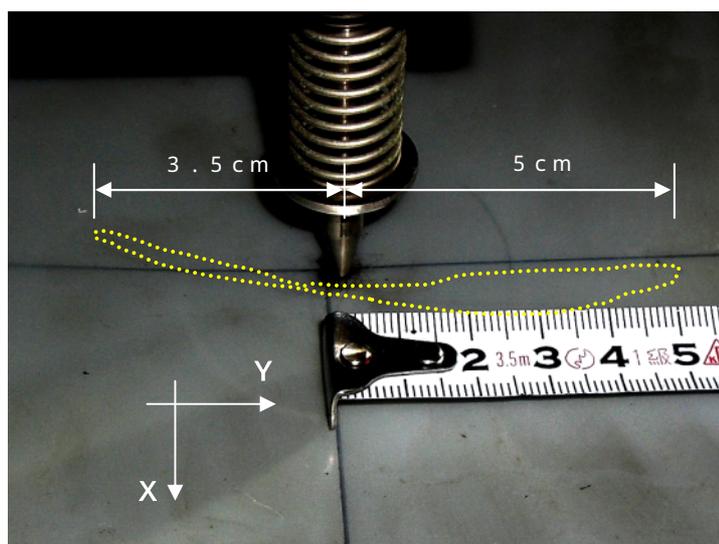
- a) 本震時、入院患者220名に加えて、当直の医師5名程度及び各階にスタッフ3名以上、その他ガードマン等もいた。
- b) 今回の地震による被害等は特に報告されていない。2008年岩手・宮城内陸地震も経験したことになるが、その際は地震そのものに気づかなかった。
- c) 免震挙動について、(今回の地震に限らず)あとからゆっくり揺れる印象がある。

免震層の目視調査により、加速度計の付近に設置されていたけがき変位計において、ほぼY軸に沿って北北東方向に+5.0cm、-3.5cm程度のすべり軌跡が見られた(図-5.4.3)。その他、F建築物(第I編5.4.6項参照)と同様に、変形方向の鉛ダンパー屈曲部の表面に軽微な変状がみられた(図-5.4.4、図-5.4.5)。

建物周辺のエキスパンションの手すり部分において、Y方向にスライドすべき金具の基部に3cm程度のゆがみと汚れ跡の露出が見られた(図-5.4.6)。何らかの原因で金具部分がうまく挙動しなかったものと考えられる。

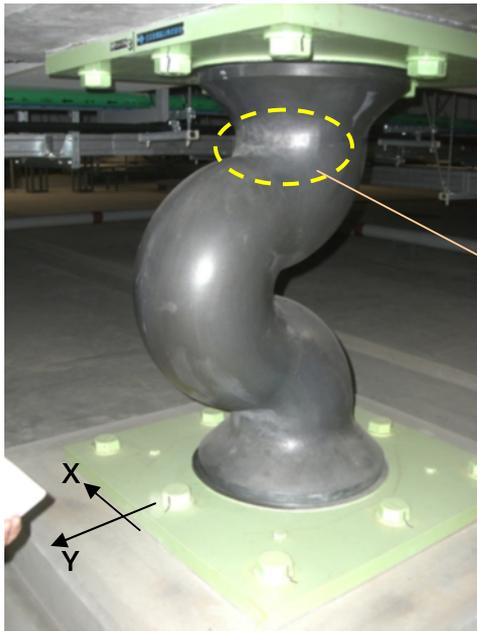


(a) 変位計設置状況

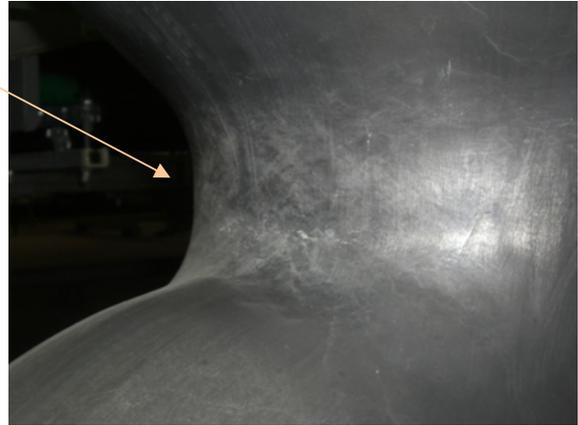


(b) けがき変位跡(点線)

図-5.4.3 けがき変位計

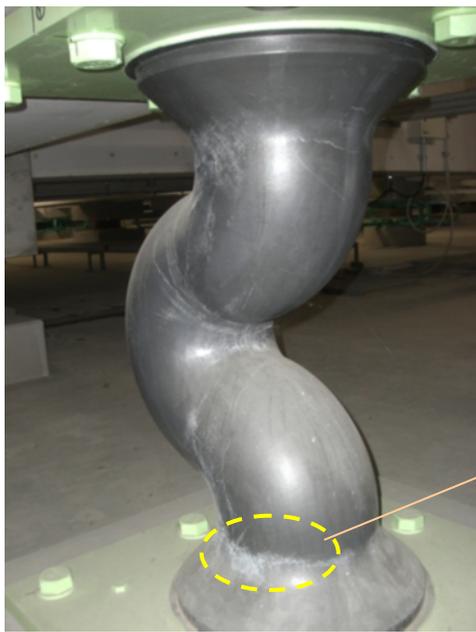


(a) 外観



(b) 表面の変状

図-5.4.4 Y方向鉛ダンパー



(a) 外観



(b) 表面の変状

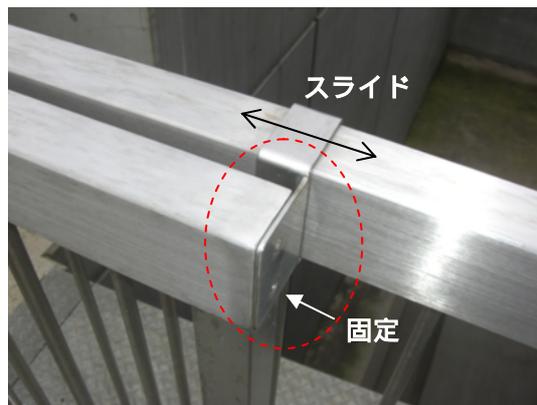
図-5.4.5 X方向鉛ダンパー



(a) 正側残留変位 (約 2 cm)



(b) 負側残留変位 (約 2.5 cm)



(c) スライド金具 (正常な状態)

図-5.4.6 エキスパンション部スライド金具 (Y方向) における変状

5.4.2 I 建築物

(1) 建築物概要

I 建築物は、岩手県久慈市において、平成11年に建設された鉄筋コンクリート造8階建ての免震建築物（共同住宅）である（図-5.4.7）。くい基礎が採用されており、GL - 25.3mを支持層とするSC杭で支持されているが、地盤が軟弱であることから、さらに敷地外周をソイルセメントコラム（改良長GL - 3m~11m）で囲むように地盤改良を行っている。



(a) 建築物外観



(b) 免震であることの表示（最大変形量50cm）

図-5.4.7 I 建築物（RC造8階建て）

建築物の平面形状はおおよそ南北15m×東西14mの矩形であり、以下の免震装置が設置されている。

積層ゴム支承材... 6基（ 800）

鋼棒ダンパー... 4基（ 90）

鉛ダンパー... 6基（東西方向×2、南北方向×4）

(2) 被害等の状況

建設地周辺の本震による震度は5強とされている。

建物管理者へのヒアリングを行い、次のような証言が得られた。

- 建築物内部には強震計が設置されており地震観測が行われていた（図-5.4.8）が、記憶容量の問題で本震時には正常動作せず、デジタルデータは取得できなかった。
- 免震効果を把握するために、居住者を対象として、独自にアンケート調査を実施する予定である。

目視調査の結果、免震層の中央部及び外縁部の2箇所に設置されたけがき変位計において、いずれも東向きに20cm、西向きに10cm程度の変位が記録されていた（図-5.4.9）。その他、鋼材ダンパーの取り付けボルト部の塗料のはがれ及びボルトの緩み（マーキングのずれ）、可撓ゴム配管の移動跡が見られた（図-5.4.10）。

なお、図-5.4.11に示すとおり、敷地周辺を含め、付近の建築物等には被害は見られなかった。



(a) 収録装置 (Akashi製SMAC-MDU) (b) 地震計設置状況 (免震層内)

図-5.4.8 地震観測状況



図-5.4.9 けがき変位計測状況



(a) 鋼材ダンパー取り付けボルト部 (b) 可撓ゴム配管部の移動跡

図-5.4.10 免震層内の変状



図-5.4.11 周辺の状況 (被害なし)

5.4.3 J 建築物

(1) 建築物概要

J 建築物は、青森県八戸市において、平成10年に建設された鉄骨鉄筋コンクリート造10階建て+地下1階の免震建築物（事務所）である。

建築研究所による強震観測を行っており、本震を含めて観測記録が得られている。観測記録に関しては、デジタルデータを入手し、解析を実施した。詳細は5.5節を参照されたい。

(2) 被害等の状況

本震の震度は6弱とされた地域である。

免震層の目視調査では特に変状は見られなかった（図-5.4.12）。ただし、免震層の壁の周辺に資材のダンボールが積み上げられており（これ自体は望ましくないが）、調査時に約1.5cm程度の間隙が生じていた（図-5.4.13）ことから、その程度の変形量が生じた可能性がある。

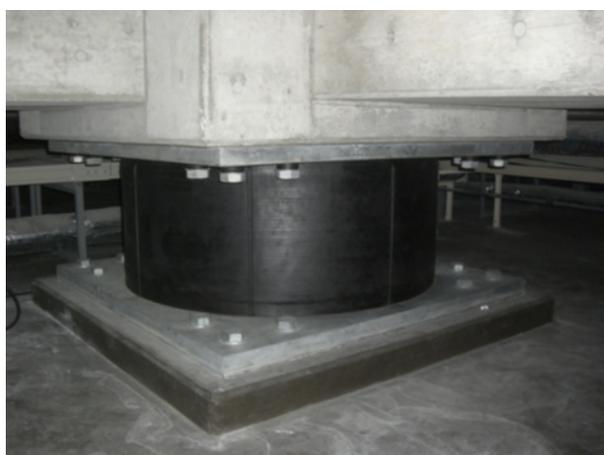


図-5.4.12 積層ゴム支承



図-5.4.13 免震層の壁と資材との隙間

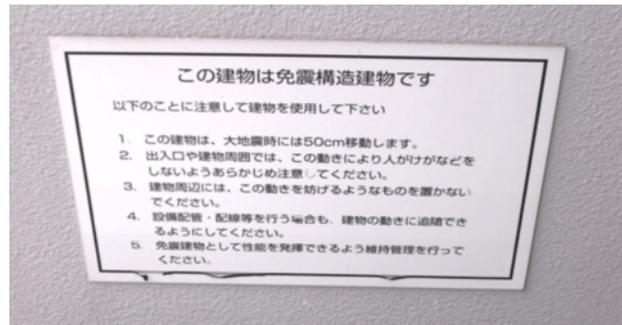
5.4.4 K 建築物

(1) 建築物概要

K 建築物は、青森県八戸市において、平成17年に竣工した鉄筋コンクリート造7階建て+地下1階の免震建築物（病院）である（図-5.4.14）。馬淵川の100mほど南側に位置しており、GL - 13m程度を支持層とする場所打ちコンクリート杭に、GL - 2m ~ 7m程度の地盤改良を併用する工法が採用されている。



(a) 建築物外観



(b) 免震であることの表示（最大変形量50cm）

図-5.4.14 K 建築物（RC 7階+地下1階）

建築物の平面形状はおおよそ東西70m × 南北80mの矩形のうち一つの角部を切り落としたようなやや複雑な形状であり、以下の免震装置が設置されている。

天然ゴム系積層ゴム支承材...47基（ 800）

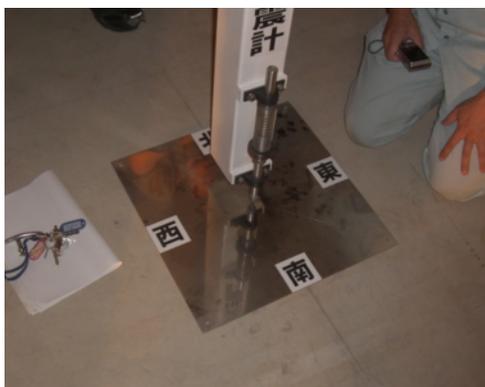
鉛プラグ入り積層ゴム支承材...44基（ 800）

弾性すべり支承...36基

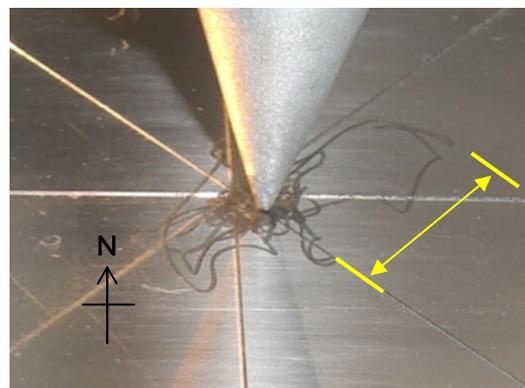
(2) 被害等の状況

建設地周辺の本震による震度は6弱とされている。

免震層の目視調査により、免震層に設置されたけがき変位計において、北東方向に最大2 cm程度の変形が記録されていた（図-5.4.15）。積層ゴムの残留変位等は見られなかった（図-5.4.16）。弾性すべり支承のゴムカバー上端の隙間周辺にほこりの除去されたような形跡があったが、本震時に生じたものか不明である（図-5.4.17）。その他、エキスパンション部を含め、建築物周囲に変状は見られなかった。



(a) 外観



(b) 変位オービット（北東方向、2 cm程度）

図-5.4.15 けがき変位計測状況



図-5.4.16 積層ゴム支承 (R B / L R B の別は不明)

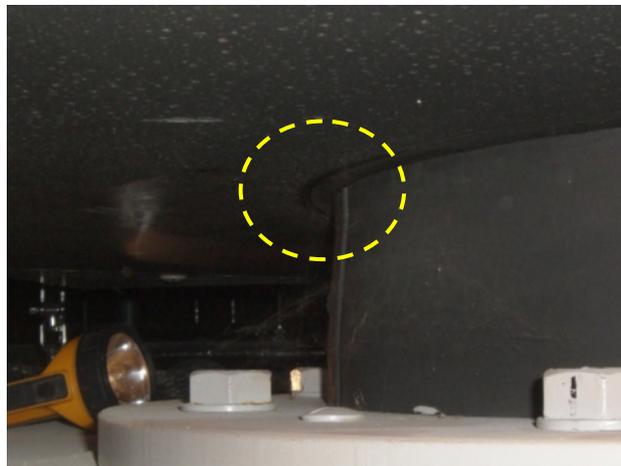


図-5.4.17 弾性すべり支承ゴムカバー周辺の変状

5.4.5 C 建築物

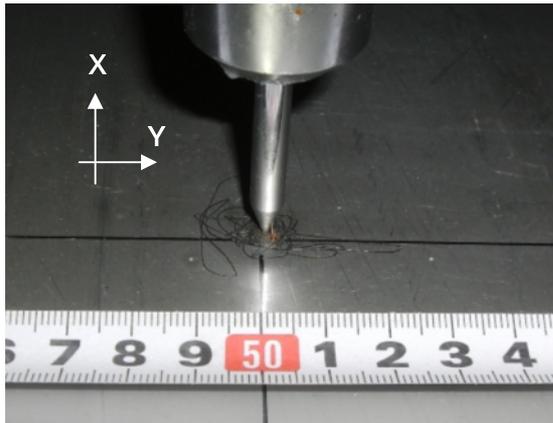
(1) 建築物概要

建築物概要については、第 編5.4.3項を参照のこと。

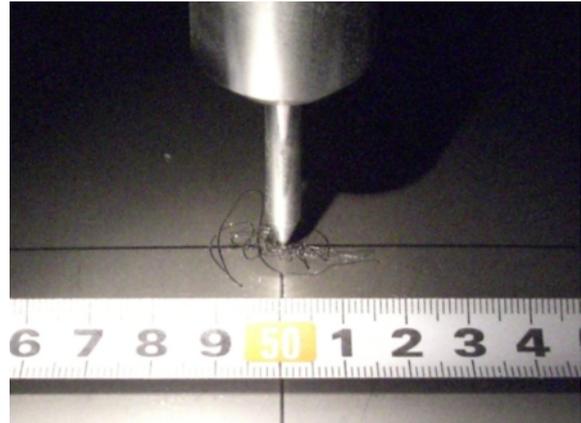
(2) 被害等の状況

建設地周辺の本震による震度は5弱（一関市山目）とされている。

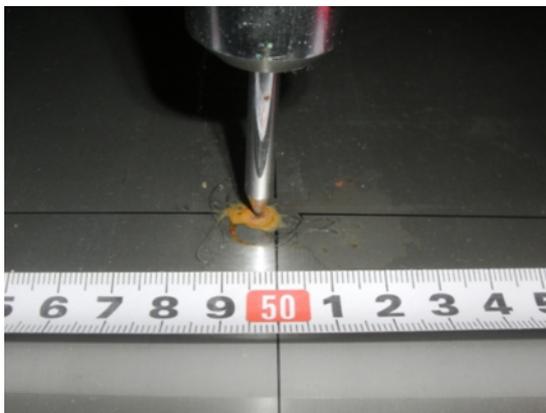
免震層の目視調査として、けがき変位計による軌跡を観察した。5箇所のいずれもほぼ「ト」形を示し、最大変位量は片側1.5cm～2cm程度であった（図-5.4.18）。その他の変状はみられなかった。



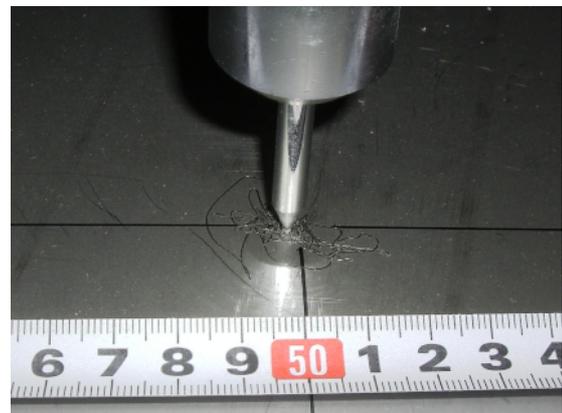
(a) けがき変位計



(b) けがき変位計



(c) けがき変位計



(d) けがき変位計

図-5.4.18 けがき変位計オービット（方向については第 編と同じ）

5.5 観測地震記録に基づく免震建築物の振動特性等の調査

岩手県沿岸北部の地震の被災地においては、2棟の免震建築物（H建築物、J建築物）で地震観測が行われており、免震挙動が確認できた。本節では、これらについて、第 編の5.5節と同様に地震観測記録及び記録されたデジタルデータを用いて免震建築物の振動特性等に関する検討を実施したので、その結果を示す。

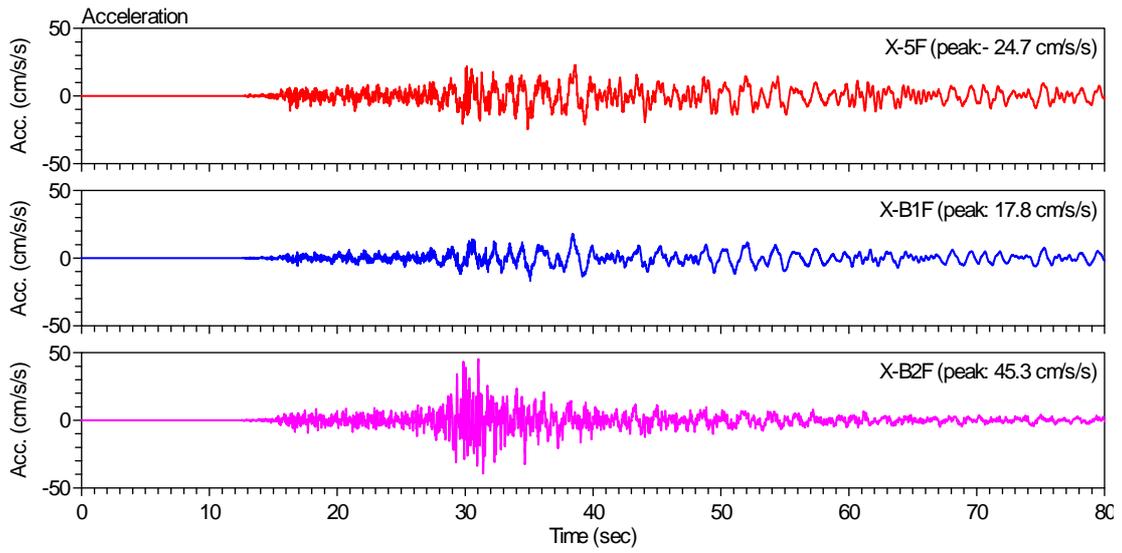
5.5.1 H建築物

H建築物では、基礎（免震層直下（地下2階と表示））及び地下部分（免震層直上（地下1階））及び屋上階（5階と表示）で地震観測が行われている。ここでは本震時の加速度記録から、地震動の特徴と免震建築物の挙動の概要を示す。水平方向に関する記号については、X、Y方向は、それぞれ北に対して124度、214度方向回転させた方向に対応する。Z方向は鉛直方向を意味する。

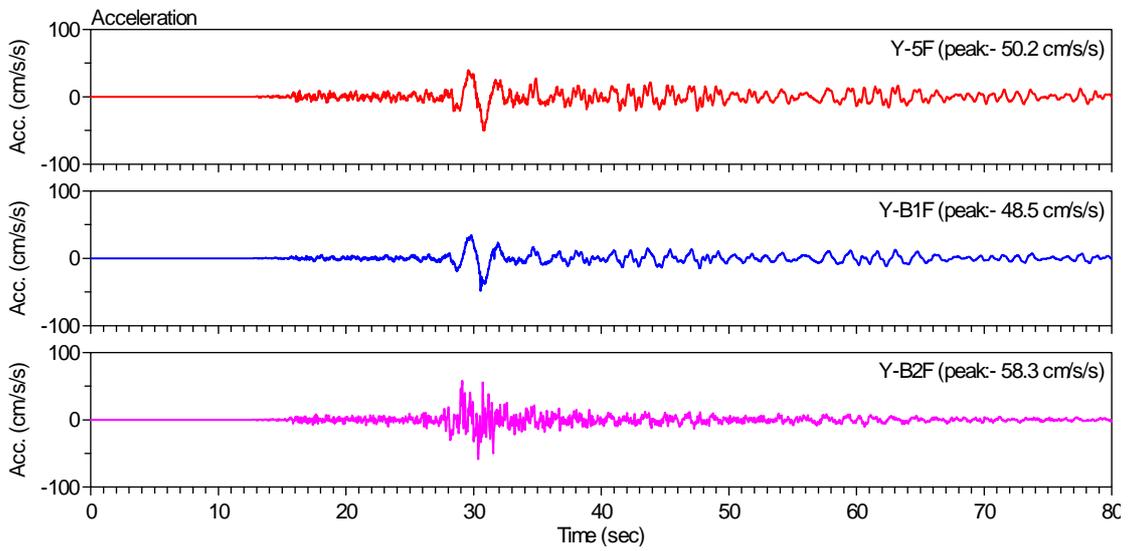
図-5.5.1(a)～(c)に、水平2方向（X、Y）と鉛直方向（Z）それぞれの方向における地下2階、地下1階及び屋上階の加速度波形を並べた。これらの最大値について比較して表-5.5.1にまとめた。水平方向の地下1階の最大加速度は、地下2階のそれに比べて、X方向で約1/2.5、Y方向で約4/5に低減されている。一方で、鉛直動については、屋上階の最大加速度は、基礎のそれに比べて、3倍程度の増幅が見られる。

表-5.5.1 H建築物における本震時の観測記録の最大値

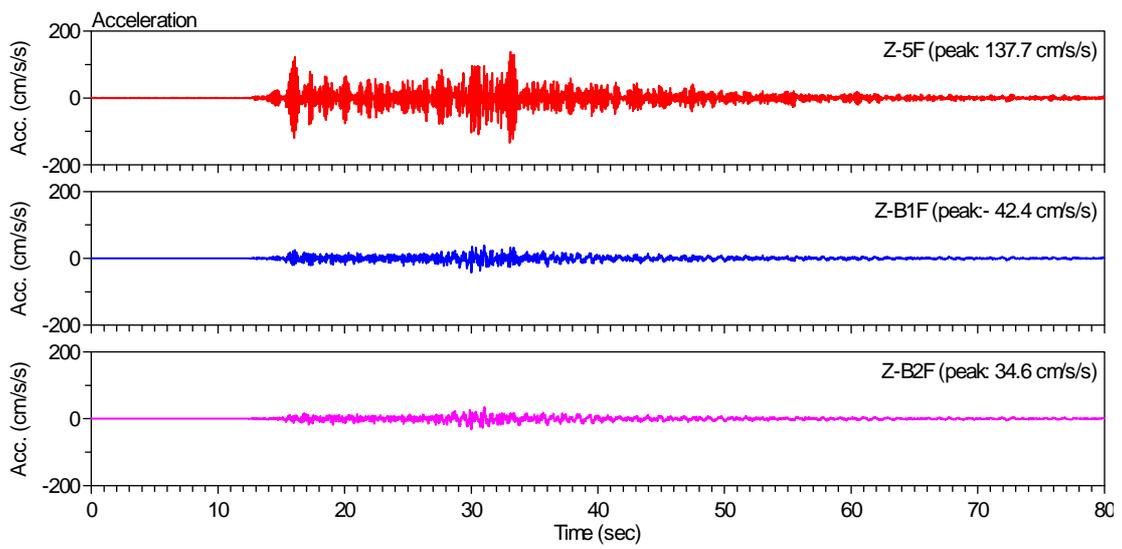
位置	X [gal]	Y [gal]	Z [gal]	計測震度
R F	24.69	50.17	137.68	4.2
B 1	17.81	48.48	42.40	4.1
免震基礎	45.32	58.26	34.57	3.9



(a) X 方向



(b) Y 方向



(c) Z 方向

图-5.5.1 加速度波形 (H 建筑物)

図-5.5.2に、地下2階における擬似速度応答スペクトル（減衰定数5%）を示す。地下2階における水平方向の擬似速度応答スペクトルは、1.0~2.0秒にピークを示す特性を有し、Y方向で大きい値を示す。鉛直方向の擬似速度応答スペクトルは、水平X方向のそれとよく似た形状を示す。

図-5.5.3に、地下2階に対する地下1階及び屋上階の加速度波形（水平方向）のフーリエスペクトル比を示す。地下2階に対する地下1階及び屋上階のフーリエスペクトル比における1次の卓越振動数は、0.5~0.8Hz(1.2~2秒)付近にあり、免震層を含めた建物の卓越振動数と考えることができる。

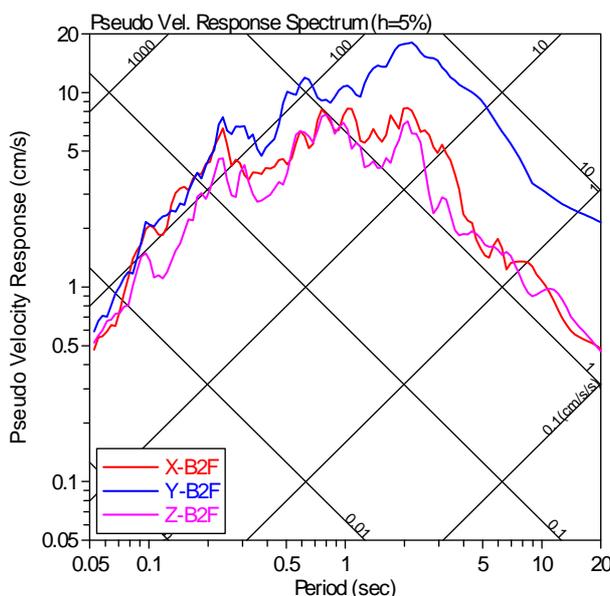


図-5.5.2 地下2階における擬似速度応答スペクトル（減衰定数5%）

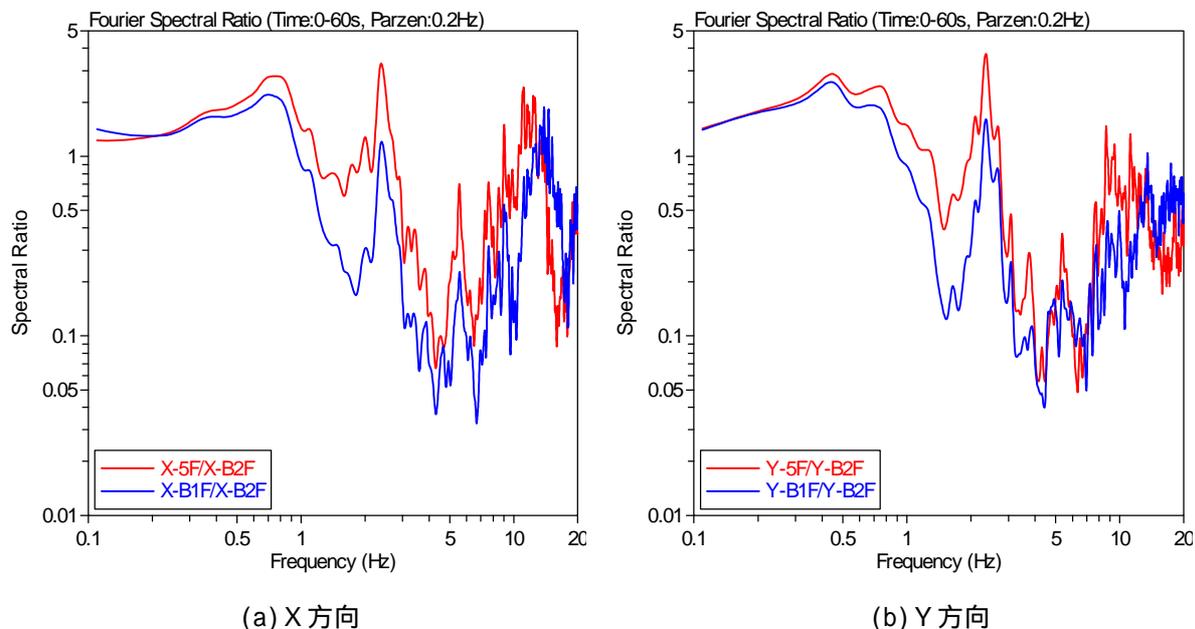


図-5.5.3 地下2階に対する地下1階及び屋上階のフーリエスペクトル比（水平方向）

図-5.5.4に、地下1階に対する屋上階の加速度波形のフーリエスペクトル比（水平方向）を示す。上部構造の卓越振動数は、X方向、Y方向とも約2 Hzである。

図-5.5.5に、地下2階に対する地下1階及び屋上階の加速度波形（鉛直方向）のフーリエスペクトル比を示す。鉛直方向における上部構造の卓越振動数は、8Hz付近にある。地下1階と屋上階の鉛直加速度は、同様な増幅特性を示す。

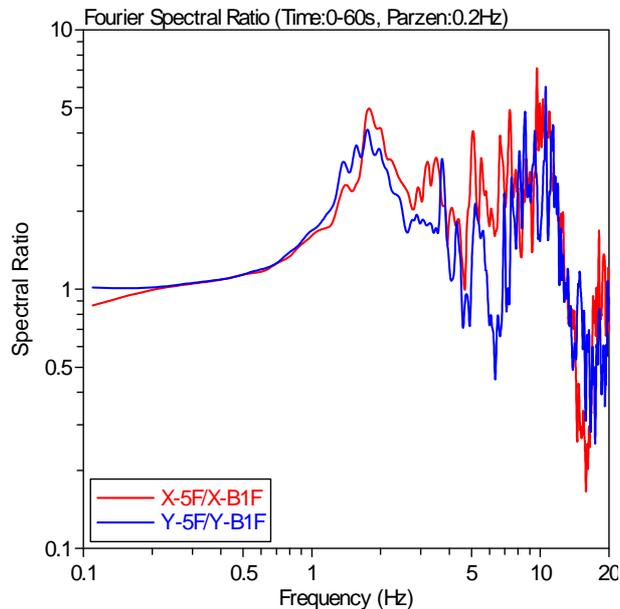


図-5.5.4 地下1階に対する屋上階のフーリエスペクトル比（水平方向）

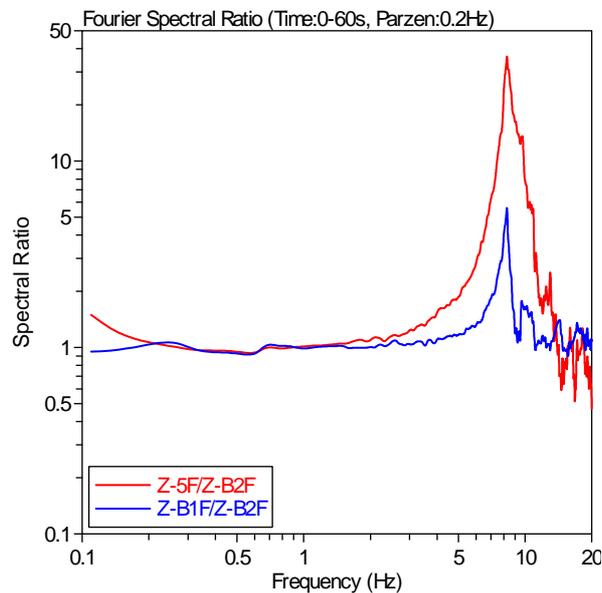
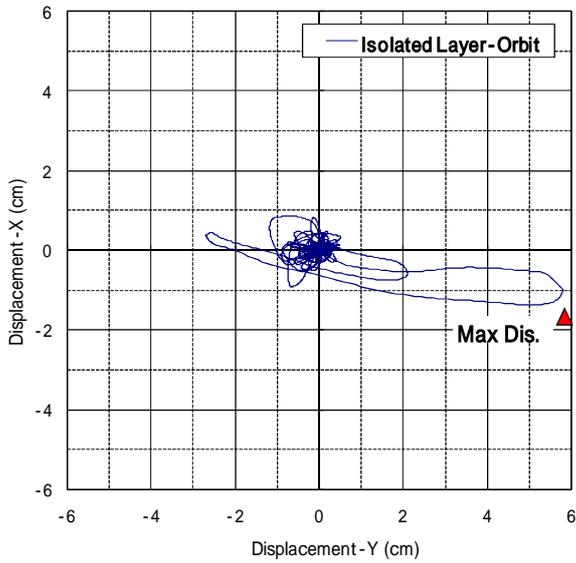
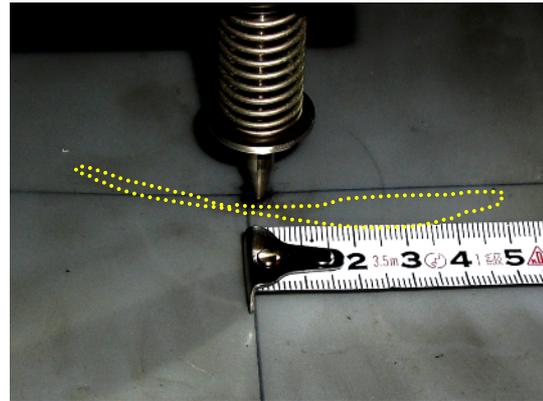


図-5.5.5 地下2階に対する地下1階及び屋上階のフーリエスペクトル比（鉛直方向）

図-5.5.6に、免震層の水平変位の軌跡を示す。免震層の変位は、地下1階（免震層の直上）と地下2階（免震層の直下）の加速度波形をそれぞれフーリエ変換するとともに0.1Hzのハイパスフィルター処理し、各振動数成分(f)ごとに $(2/f)^2$ で除した後フーリエ逆変換することによって変位波形を計算した上で、その差として求めた。免震層の最大変位（図中「Max Dis.」で示した位置）は、原点より約5.87cmとなる。



(a) 解析値



(b) 実測値（画像不鮮明のため外形を補足的に示したもの）

図-5.5.6 免震層の水平変位の軌跡

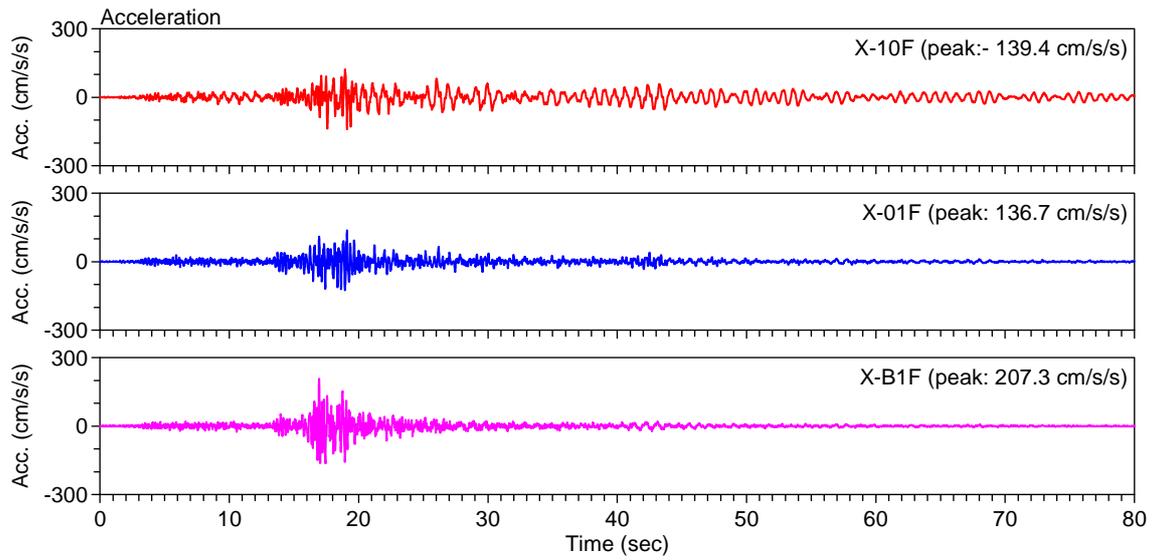
5.5.2 J 建築物

J 建築物では、地下1階（免震層直下）及び1階（免震層直上）及び最上階（10階と表示）で地震観測が行われている。ここでは本震時の加速度記録から、地震動の特徴と免震建築物の挙動の概要を示す。水平方向に関する記号については、X、Y方向は、それぞれ北に対して164度、254度方向回転させた方向に対応する。Z方向は鉛直方向を意味する。

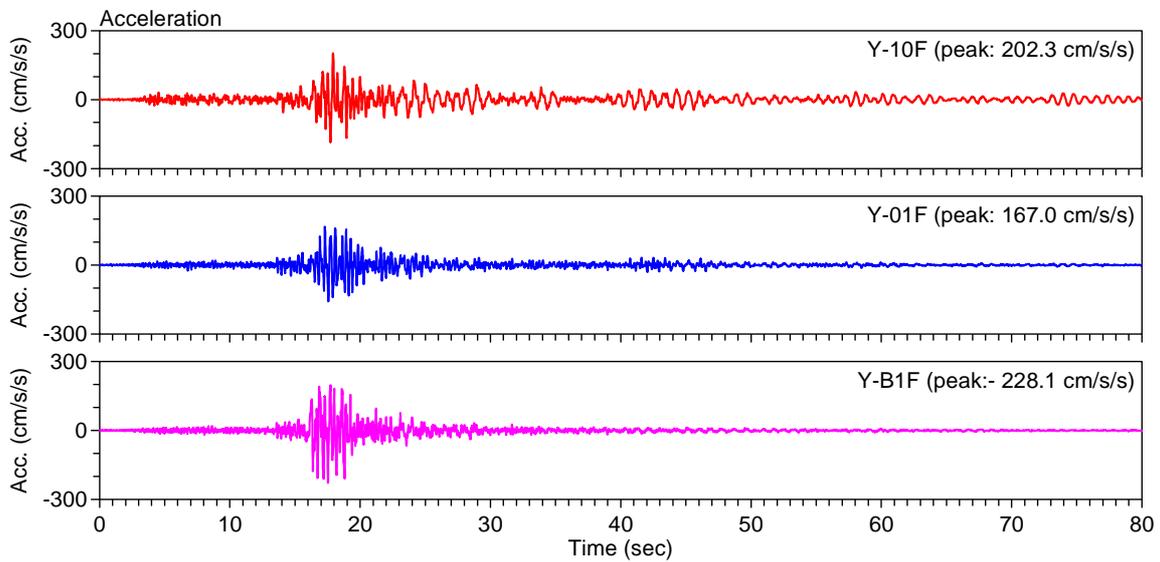
図-5.5.7(a)~(c)に、水平2方向（X、Y）と鉛直方向（Z）それぞれの方向における地下1階、1階及び最上階の加速度波形を並べた。これらの最大値について比較して表-5.5.2にまとめた。水平方向の1階の最大加速度は、地下1階のそれに比べて、X方向で約0.6倍、Y方向で約0.75倍に低減されている。一方で、鉛直動については、地下1階の最大加速度に比べて、1階で小さくなるが、屋上階ではまた増幅し、地下1階の最大加速度の2.4倍程度となる。

表-5.5.2 J 建築物における本震時の観測記録の最大値

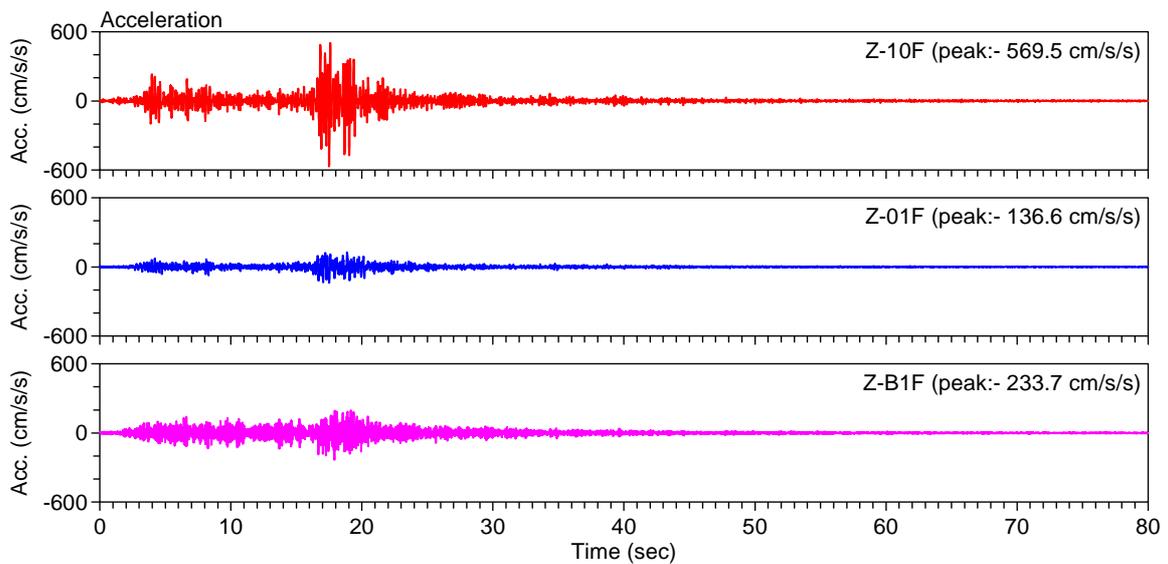
位置	X [gal]	Y [gal]	Z [gal]
10F	139.4	202.3	569.5
1F	136.7	167.0	136.6
免震基礎	207.3	228.1	233.7



(a) X 方向



(b) Y 方向



(c) Z 方向

图-5.5.7 加速度波形(J 建筑物)

図-5.5.8に、地下1階における擬似速度応答スペクトル（減衰定数5%）を示す。地下1階における水平方向の擬似速度応答スペクトルは、Y方向で大きく、0.3~0.8秒に大きな値を示す特性を有する。鉛直方向の擬似速度応答スペクトルは、水平X方向のそれと比べてかなり小さくなる。

図-5.5.9に、地下1階に対する最上階の加速度波形（水平方向）のフーリエスペクトル比を示す。地下1階に対する屋上階のフーリエスペクトル比における1次の卓越振動数は、1.0Hz（1.0秒）付近にある。地下1階に対する1階のフーリエスペクトル比における卓越振動数は、1.0Hzより低くなる。

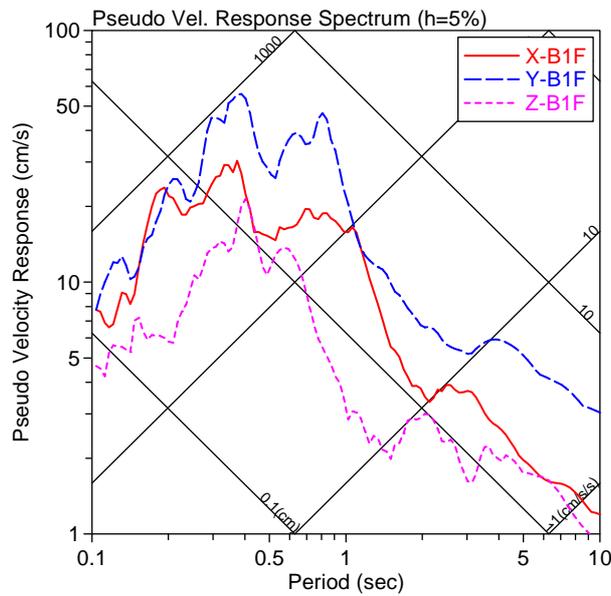
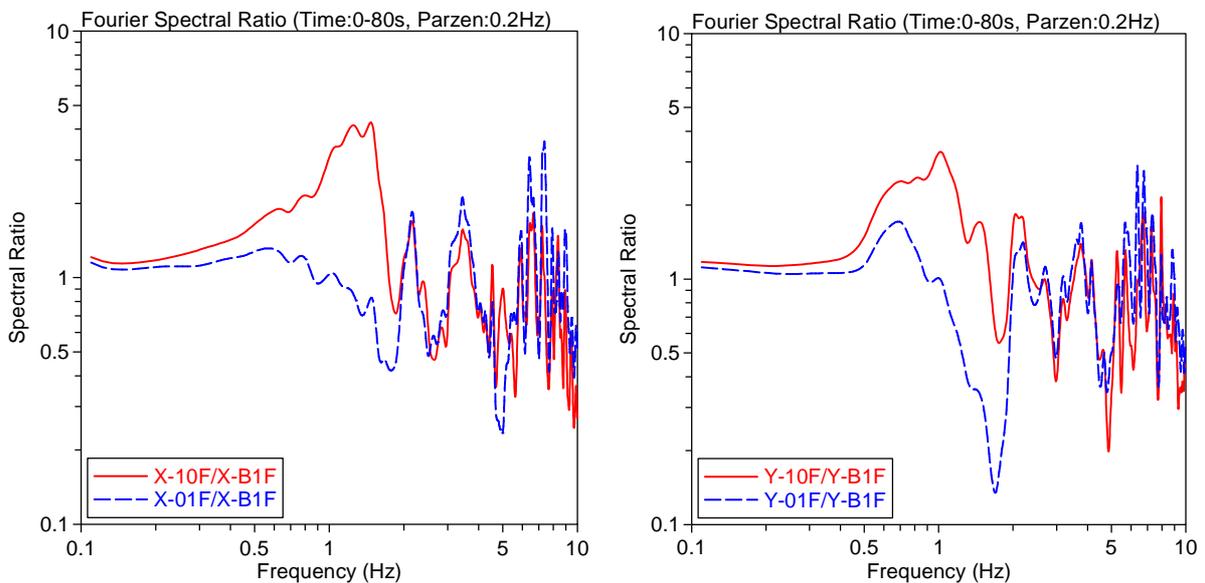


図-5.5.8 地下1階における擬似速度応答スペクトル（減衰定数5%）



(a) X方向

(b) Y方向

図-5.5.9 地下1階に対する1階及び最上階のフーリエスペクトル比（水平方向）

図-5.5.10に、1階に対する屋上階の加速度波形のフーリエスペクトル比（水平方向）を示す。上部構造の卓越振動数は、X、Y方向とも約1.5Hzである。

図-5.5.11に、地下1階に対する1階及び最上階の加速度波形（鉛直方向）のフーリエスペクトル比を示す。鉛直方向における免震建築物の卓越振動数は、5 Hz付近にある。

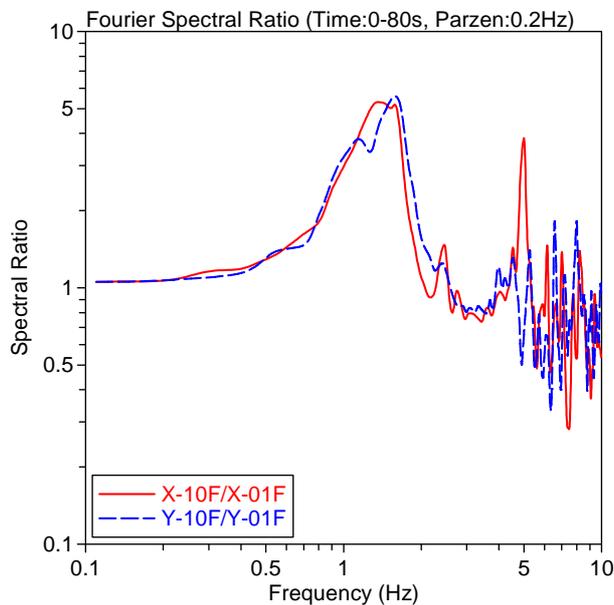


図-5.5.10 1階に対する屋上階のフーリエスペクトル比（水平方向）

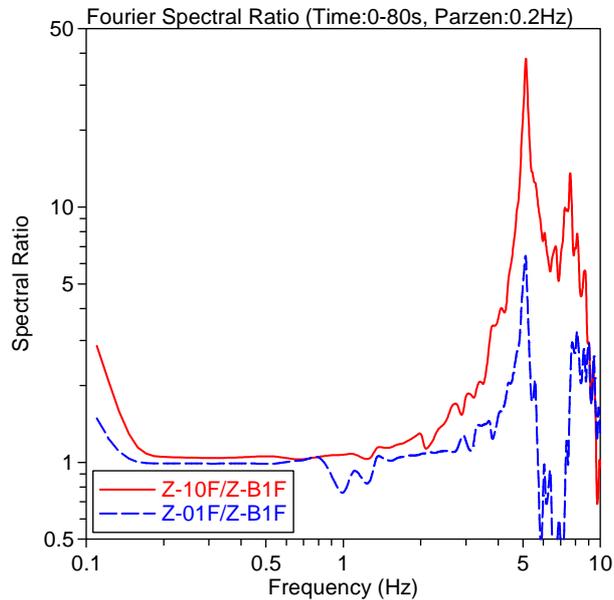


図-5.5.11 地下2階に対する地下1階及び屋上階のフーリエスペクトル比（鉛直方向）

図-5.5.12に、免震層の水平変位の軌跡を示す。免震層の変位は、H建築物（5.5.1項）と同様に、1階（免震層の直上）と地下1階（免震層の直下）の加速度波形を、それぞれフーリエ変換するとともに0.1Hzのハイパスフィルター処理し、各振動数成分(f)ごとに $(2/f)^2$ で除した後フーリエ逆変換することによって変位波形を計算した上で、その差として求めた。免震層の最大変位は、Y方向で大きく、最大変位は約1.76cmとなる。

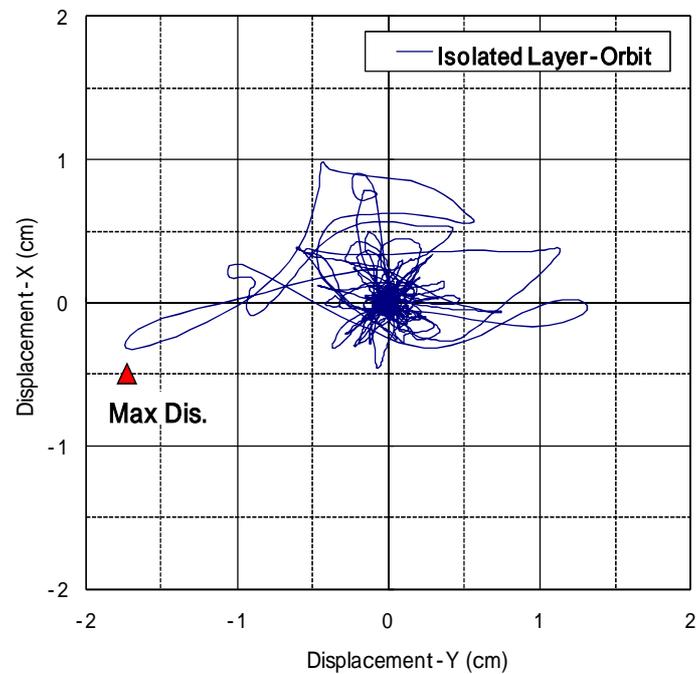


図-5.5.12 免震層の水平変位の軌跡

5.6 まとめ

2008年7月24日に発生した岩手県沿岸北部の地震における免震建築物の実態調査を行った。

- a) 2008年岩手・宮城内陸地震の場合と同様に、本震の最大震度6弱と発表された地域にも免震建築物が建てられていたが、免震層周辺の目視調査の結果などを踏まえても、設計用地震力(地震動)と比較して入力はかなり小さかったと考えられる(J建築物、K建築物)。また、公表された付近の震度は免震建築物の設計用地震動で想定するものよりもかなり小さいと思われる5強であったが、けがき変位計で20cmに達する変位が記録されていた建築物(I建築物)があり、この建築物の本震時の免震挙動を今後評価する必要があると考えられる。
- b) 免震建築物の挙動を明らかにするために、建築物の本震時の加速度記録を入手し、その解析を行った(H建築物、J建築物)。免震層直下階に対する免震層直上階の水平方向の最大加速度は、0.6~0.8倍程度に低減し、免震効果が確認された。地震観測を行っている2棟のうち1棟(H建築物)では、加速度の観測装置とほぼ同じ位置にけがき変位計が設置されており、その軌跡は建築物のY軸(北北東)方向に卓越し、加速度記録を積分して得られた免震層の水平変位の軌跡と良い対応を示した。

今後は、第 編と同様に、免震建築物の設計基準の高度化に資する検討を加える予定である。

謝辞

各建築物の現地調査に当たっては、地震直後の混乱した状況にもかかわらず、建築物図面の提供や免震層の目視調査へご協力いただきました。また、解析に当たっては、けがき変位計の記録及び地震観測のデジタルデータの提供、さらにそれらの公開について快く許可をいただきました。それぞれご担当いただいた方々に深く感謝いたします。

図-5.2.1はPaul Wessel氏とWalter H. F. Smith氏が作成したGMT^{第 編3.18)}を用いて作成したものです。

参考文献及び参照サイト

- 5.1) (社)日本免震構造協会：国内の免震建物一覧表、MENSHIN、No.28(2000.5)、No.33(2001.8)、No.60(2008.5)